



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20240080

数字出版日期: 2024-11-06; 数字出版网址: <http://link.cnki.net/urlid/12.1355.N.20241105.1719.009>

界面水蒸发用纤维素基材料及其应用研究进展

刘鹏涛, 朱 铭, 张 蕊, 袁思月
(天津科技大学轻工科学与工程学院, 天津 300457)

摘要: 淡水资源的匮乏正在严重影响着人类的生存和发展, 采用太阳能蒸发技术将海水转化为淡水, 是解决我国水资源短缺问题的重要途径。纤维素作为太阳能蒸发器的基质材料不仅具有环境友好性的优势, 还在光热转换和蒸发过程中发挥了多重作用, 因此在海水淡化领域有极大潜力。本文简要介绍了光热材料和基质材料, 主要介绍了以不同形式的纤维素材料(如气凝胶、膜、纸、棉织物、泡沫)作为基质材料在界面水蒸发中的研究进展, 并对其应用存在的局限性和未来研究方向进行讨论。

关键词: 界面水蒸发; 纤维素基; 光热转换; 海水淡化

中图分类号: TS71 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2024)06-0001-06

Research Progress in Cellulose-Based Materials for Interfacial Water Evaporation and Their Applications

LIU Pengtao, ZHU Ming, ZHANG Rui, YUAN Siyue

(College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: The scarcity of freshwater resources is severely impacting human survival and development. Utilizing solar evaporation technology to convert seawater into freshwater is a crucial approach to addressing water scarcity in China. Cellulose, as a substrate material for solar evaporators, offers not only environmental benefits but also plays multiple roles in photo-thermal conversion and evaporation processes. Therefore, it holds significant potential in the field of seawater desalination. This article briefly introduces photothermal and substrate materials, focusing on the research progress of different forms of cellulose materials (such as aerogels, membranes, paper, cotton fabrics, and foams) as substrate materials in interfacial water evaporation. The limitations of their applications and future research directions are also discussed.

Key words: interfacial water evaporation; cellulose-based; photothermal conversion; seawater desalination

引文格式:

刘鹏涛, 朱铭, 张蕊, 等. 界面水蒸发用纤维素基材料及其应用研究进展[J]. 天津科技大学学报, 2024, 39(6): 1-6.

LIU P T, ZHU M, ZHANG R, et al. Research progress in cellulose-based materials for interfacial water evaporation and their applications[J]. Journal of Tianjin university of science & technology, 2024, 39(6): 1-6.

近年来, 全球人口的增长和工农业的发展显著增加了淡水需求, 预计未来淡水需求将增加 7 倍, 而自然资源的枯竭使这一需求显得更加紧迫^[1]。此外, 人类在开发、运输和利用能源的过程中排放的大量有害物质, 如有机污染物、金属离子、溢油等, 污染了水资源, 导致可供饮用的水越来越少。海水淡化是缓解

淡水危机的有效方法。人们广泛应用的海水淡化技术, 如反渗透^[2]、低温多效蒸馏^[3]、多级闪蒸^[4]等技术, 装置建造成本昂贵, 且都要依赖化石燃料, 容易对环境造成严重污染^[5], 无法成为解决淡水短缺问题的长久之计。太阳能是一种清洁、绿色的能源, 可通过光热材料收集并转化为热能, 这种利用太阳能光热

收稿日期: 2024-04-18; 修回日期: 2024-09-23

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFC2105503)

作者简介: 刘鹏涛(1979—), 女, 河北定州人, 副研究员, pengtaoliu@tust.edu.cn

转换进行水处理的方法是一种低成本、可持续且简单的技术。太阳能界面水蒸发技术是把光热材料负载于具有保温功能的基质材料上,并将其置于海水表面,通过光热转化材料吸收太阳能,进而通过温度的升高实现对海水的蒸发^[6]。光热材料具有将光能转化为热能的能力,广泛应用于界面水蒸发中。纤维素材料是一种理想的基质材料,它们不仅具有环境友好和来源丰富的优势,而且在光热转换过程中发挥着重要作用。基于此,本文综述了不同形式的纤维素材料(如气凝胶、膜、纸、棉织物、泡沫)作为基质材料在界面水蒸发中的应用进展,以期新型纤维素基材料的开发和应用提供理论基础,推动可持续发展技术的进步。

1 光热材料

太阳能光热转换的关键在于光热材料的选择。能够吸收太阳能并将其高效转换为热能的材料是高

附加值光热材料的首要特征。此外,这些材料需要具备广泛的来源,同时需要有可规模化制备和成本低廉的优势。近年来,太阳光照下产生光热效应的材料受到了广泛关注,为太阳能光热转换器件的开发提供了一系列具有应用潜力的候选材料,其中包括:等离子体金属材料,如金、银、铜、铝等金属及其合金;半导体材料,如金属氧化物和硫化物;碳基材料,如石墨烯、氧化石墨烯(GO)、还原氧化石墨烯(rGO)、碳纳米管(CNT);聚合物材料,如聚多巴胺(PDA)、聚吡咯(PPy)等。这些材料具有不同的光热机制,这些机制主要包括等离子体局部加热^[7]、电子空穴的产生和弛豫^[8]以及分子热振动^[9]等(图 1^[5])。每种材料在光吸收方面都具有不同的局限性,例如等离子体金属材料具有有限的光吸收范围,可以通过调整纳米颗粒的尺寸或者与其他光热材料复合发挥光热协同作用,提高其光热性能。纤维素基材料在与光热材料复合时,不仅能高效吸收太阳能并转换为热能,还能提供稳定的多孔结构,提升光热材料的整体性能。

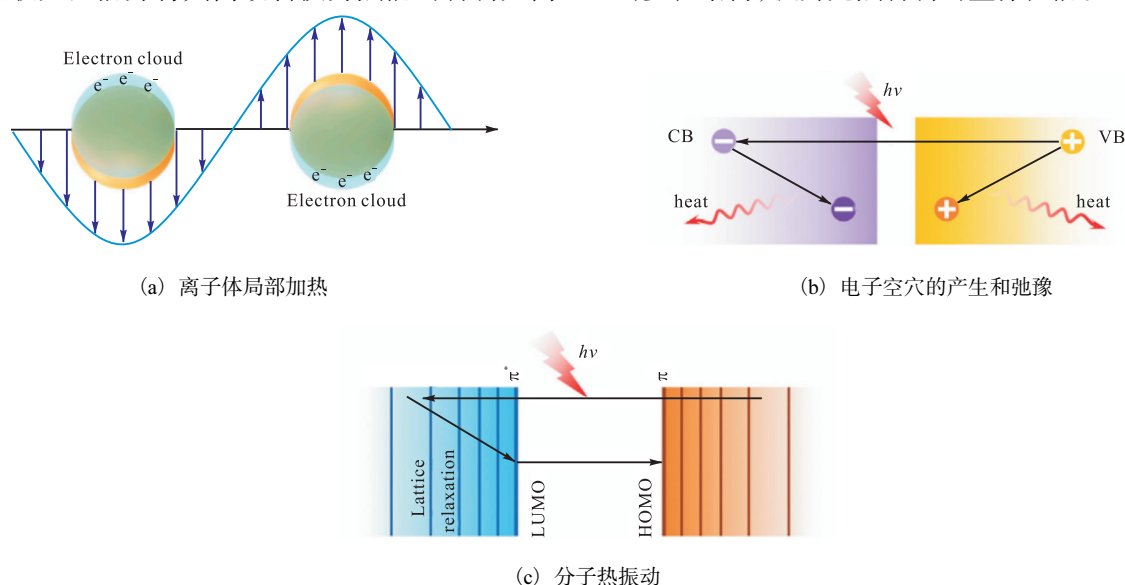


图1 各类光热材料的光热机制

Fig. 1 Photothermal mechanisms of various types of photothermal materials

2 基质材料

基质材料是吸光材料的载体,也是太阳能光热材料的重要组成部分之一。在光热水蒸发器件中,它扮演着隔热和吸水的角色。为了提高蒸发器的水分传输和保温性能,需要选择低密度、高亲水性的多孔介质作为基质材料。常见的基质材料包括气凝胶、膜、纸、纤维、泡沫、高分子化合物等^[5]。大部分光热基质材料采用的是难降解的合成聚合物和石油基原料,这可能

对环境造成污染。纤维素基材料具备复杂的多层多孔结构,尤其是三维网状多孔结构,使其不仅在光热管理方面具有显著优势,而且有利于水分持续输送到光热蒸发层,从而有效增强水分蒸发效率^[10]。此外,纤维素材料具有高结晶度,这赋予了其出色的机械稳定性,同时其丰富的表面官能团也为各种光热材料的直接沉积或吸附提供了有利条件^[11]。纤维素分子本身具有大量游离羟基,这赋予其良好的亲水性,而其低热导率则有效提升了其隔热性能,显著限制了热量

向水体扩散的过程。综上所述,纤维素凭借其诸多优异性能,被视为理想的光热蒸发基体材料。

2.1 纤维素气凝胶

气凝胶因具有高孔隙率、低导热系数、高比表面积、低密度以及亲水性易调节等优点备受研究者关注。气凝胶是一种具有广泛应用前景的光热蒸发基体材料,目前制备气凝胶的纤维素原料主要包括纤维素纳米纤丝(CNF)和细菌纤维素(BC)。

2.1.1 CNF 气凝胶

CNF 作为一种生物源纳米材料,因具有可持续性和可生物降解性而引起了研究者的广泛研究兴趣。CNF 具有优异的力学性能、较高的长径比,可以作为复合材料内部的骨架。二硫化钼(MoS_2)具有良好的光热转换特性,但 MoS_2 纳米片之间缺乏支撑结构,内部容易坍塌。Yuan 等^[12]将 MoS_2 和 CNF 相结合通过冷冻干燥制得复合气凝胶,CNF 不仅支撑了 MoS_2 纳米片,防止其坍塌,其独特的多孔结构也显著提高了光热转换效率。当近红外激光功率密度由 0.8 W/cm^2 增加到 1.0 W/cm^2 时,温度输出从 260.4°C 最高升至 690.3°C (图 2^[12])。这主要是由于纤维素基材料的高孔隙率和亲水性,在蒸发器中纤维素基材料不仅起到结构支撑材料的作用,还通过增强水分传输能力和隔热性能,显著提高了蒸发效率。

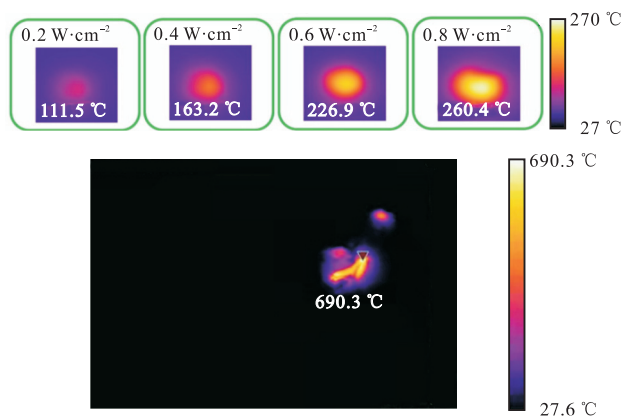


图 2 不同功率密度下 CNF/ MoS_2 气凝胶温度的变化

Fig. 2 Temperature variation of CNF/ MoS_2 aerogel at different power densities

CNF 的大孔道结构能够产生毛细作用,促进水向上泵送,类似于管道的作用,另外也可以作为 Janus 结构的基元,通过对 CNF 改性或者将光热材料涂覆疏水材料最终可得到具有相反润湿性的气凝胶。Han^[13]等以 CNF 为基元,以 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXenes 为功能填料,制备新型生物复合气凝胶 JCM。纤维素气凝胶的三维网状结构能够持续将水分输送至光热蒸

发层,从而显著提升水分蒸发效率(图 3^[13])。JCM 复合气凝胶下部为亲水的 CNF 气凝胶,上部为硅烷改性的疏水性 CNF/MXene 气凝胶,吸光度在 $200 \sim 2500 \text{ nm}$ 较宽的波长范围内扩展(图 4^[13]),其中 JC10M5 的吸光率为 95.8%,在 1 个太阳光强下,水蒸发速率为 $2.287 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{h)}$ 。CNF 气凝胶易于功能化且结构可调控,具有高孔隙率、高亲水性、低导热性的特点,应用于太阳能蒸发器设计的潜力很大,但由于气凝胶制备过程中涉及冷冻干燥等技术,成本相对较高,若实现大规模应用还需要不断改进制备工艺。

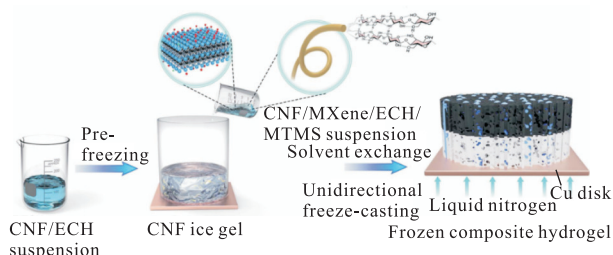


图 3 JCM 气凝胶的制备工艺示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the preparation process of JCM aerogel

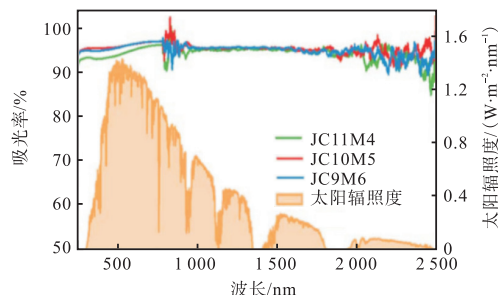


图 4 JCM 气凝胶的紫外-可见-近红外吸收光谱

Fig. 4 UV-visible-near-infrared absorption spectra of JCM aerogel

2.1.2 BC 气凝胶

以 BC 作为基质材料的太阳能界面水蒸发器具备高效的光吸收、热管理和水输送功能。BC 相互连接形成的多孔网络,以及高表面积和易于表面功能化的特性,为光热材料的有效吸收提供了可能。光热材料可以在细菌原位生长过程中与细菌纳米纤维素形成物理交联。因此,BC 作为太阳能蒸发器的基质已受到广泛关注。

Cao 等^[14]在低温下将 GO 与 BC 结合,然后采用原位还原法将银纳米粒子(AgNPs)嵌入气凝胶的三维网络中,在 1 个太阳光强下,水蒸发速率为 $2.36 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{h)}$,蒸发效率为 94.5%。除金属粒子和 GO 外,BC 上还可负载 CNTs、PPy、 MoS_2 等。BC 不仅作

为基质材料在光热蒸发器中提供了结构支撑,其独特的物理和化学特性还在光热转换和蒸发过程中发挥了重要作用。BC 的纳米纤维网络结构能够有效吸收光能并将其转化为热能,这一特性使其在光热转换过程中表现出优异的性能。Zhang 等^[15]以 BC 纳米纤维 (BCNFs) 为基体,以甲基三甲氧基硅烷 (MTMS) 为交联剂,以羟基化多壁碳纳米管 (MCNT-OH) 为光热吸收剂和导电底物,三者通过多重化学键和物理键相互作用构建光热气凝胶,光吸收率高达 93.5%。此外,BC 在蒸发器中的作用也不可忽视。BC 的高亲水性和多孔结构使其能够快速吸收和传导水分,将其输送至蒸发界面。这种高效的水分传输能力有助于蒸发界面保持湿润,从而提高蒸发效率。Wang 等^[16]制作的 Janus 蒸发器下层以 BC/炭黑 (CB)/琼脂粉的多孔复合材料为亲水性底物,上层喷涂聚二甲硅氧烷 (PDMS) 进行疏水改性,该蒸发器能达到 $1.83 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的水蒸发速率。与复杂的自下而上工艺制备的合成聚合物气凝胶相比,具有天然多孔网络的细菌纳米纤维素气凝胶可以通过简单的生物合成获得,而且光热材料可以通过原位生长稳定地负载在 BC 上,使其具有良好的光热效应。因此,BC 作为太阳能蒸发器的基质材料具有良好的应用前景。

2.2 纤维素膜

大多数用于水处理的膜都是由纤维素或合成有机聚合物制成,如聚丙烯、聚砜 (PSF)、聚偏氟乙烯 (PVDF)^[17]和聚醚砜 (PES)^[18],合成有机聚合物对环境危害较大,且不易降解。纤维素基纳米材料满足可再生、低成本和环境友好的要求,是解决海水淡化领域挑战的理想候选材料。纤维素膜的高透光性和良好的热传导性能,使其能够有效吸收光能并快速将其转化为热能。Su 等^[19]制备了 MXene 柔性 Janus 膜,采用乙基纤维素对 MXene 进行改性。随着乙基纤维素含量的增加,上层的疏水性也在增加 (不影响下层的亲水性),但光热性能逐渐降低,当乙基纤维素添加量为 0.075 g 时,膜的吸光率达到 90.81%,在 1 个太阳光强下,平均蒸发速率可达到 $1.34 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。Gan 等^[20]将四氧化三铁 (Fe_3O_4) 加入 CNF 中,制备出三维花状纤维素膜。由于相邻花瓣结构之间的多次光反射,三维花状纤维素膜在 $250 \sim 2500 \text{ nm}$ 波段的光吸收率基本超过 97% (图 5^[20]),在 1 个太阳光强下的工作温度也保持在 45°C (图 6^[20])。 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CNF}$ 光热膜的缺点是力学性能较差,使其失去了与商用纤维素基材光热层的竞争力。纤维素膜面临的最大问题

是光热层与基质的键合不稳定,影响蒸发器的稳定性,也可能会造成盐沉积。

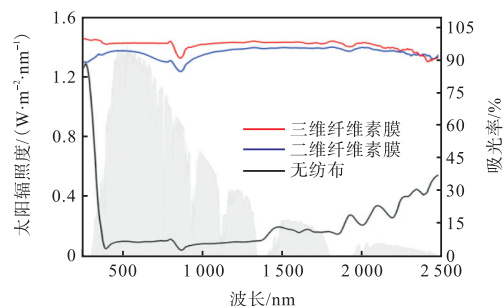


图 5 无纺布、二维和三维纤维素膜的太阳辐照度

Fig. 5 Solar spectral irradiance of nonwoven, 2D and 3D cellulose films

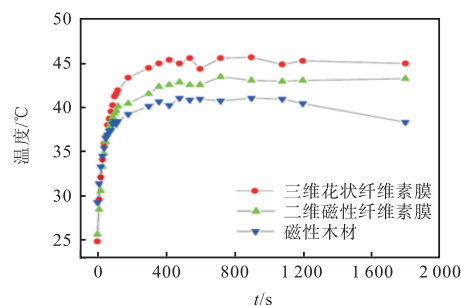


图 6 磁性木材、二维磁性纤维素膜和三维花状纤维素膜表面的平均温度随时间的函数

Fig. 6 Functions of mean temperature on the surface of magnetic wood, two-dimensional magnetic cellulose membrane and three-dimensional floral cellulose membrane over time

2.3 纤维素纸

由于生物基纤维素纸具有资源丰富、孔隙率高、方便携带等特点,因此从成本效益、蒸发速率和便携性方面来看,制造纸基蒸发器极具吸引力。纤维素纸的高吸水性和多孔性有助于水分的快速吸收和均匀分布,使其能够高效地将水分输送至蒸发界面。Qin 等^[21]制造了一种顶部吸收层为嵌入 Fe_3O_4 纳米颗粒的纤维素纤维,底部支撑基质为原始纤维素纤维的双层纸基蒸发器,在 1 个太阳光强下,10 min 内的蒸发速率为 $1.22 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。纤维素纸 (CP) 可以大量生产,其内部的纳米间隙可以调控等离子体纳米粒子的生长和分布。Dong 等^[22]利用纤维素纸作为载体,将银 (Ag) 和铜 (Cu) 纳米颗粒密集而均匀地分布在纳米间隙 (纳米原纤维之间) 中,合成的 Ag-CP 在 $250 \sim 2500 \text{ nm}$ 波长范围内的太阳能吸收效率高达 93.7%,在 1 个太阳光强下的太阳能热效率为 85.2%。研究者们通常认为二维结构的光热蒸发器存在空间利用率

低、热损失高等问题。对此, Liu 等^[23]基于折纸图案的塔状结构, 开发了一种浮动在水面上的可转换光热蒸发器, 其形状可逆、可调, 在 1 个太阳光强下的蒸发速率为 $2.67 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。纸基蒸发器的劣势在于亲水性纤维素纤维机械耐久性差, 长期暴露在水环境中容易被损坏, 另外其耐盐性也会随时间逐渐下降。

2.4 棉织物

纺织材料具有特殊柔性, 且比表面积大、孔隙率高, 研究者们以纺织材料作为基质, 设计出了大量性能优异的纺织基太阳能蒸发器器件。Maity 等^[24]通过原位化学聚合将 PPy 涂覆在棉帆布上, 水蒸发速率达到 $1.87 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。除了 PPy, rGO、MoS₂、CNT、MXene 等也可作为光热涂层。表 1 汇总了不同光热材料基于棉织物(CF)作为基质材料的太阳能蒸发器的性能对比。由表 1 可以看出, 以棉织物为基质材料的太阳能蒸发器的光热转换效率大都在 80% 以上, 水蒸发速率也较高。常规纺织品难以承受长时间浸泡, 需要对基质材料进行力学性能优化, 以提高纺织品的稳定性。Han 等^[25]通过电子束辐照诱导交联法, 在 CF 上构建 MXene/PVA 水凝胶, 进而制备坚固的 MXene 基光热织物, 在 1 个太阳光强下, 水蒸发速率为 $1.65 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。在长时间连续太阳照射 3.5% (质量分数) NaCl 溶液的蒸发过程中, 该材料也表现出良好的稳定性且无盐积累, 经过 12 个循环, 蒸发速率保持在 $1.49 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 左右。CF 可以低成本批量生产, 其亲水性和多孔结构有利于水分的输送和水蒸气的排出。CF 基复合材料具有柔性和可洗涤的特性, 在脱盐过程中沉积在光热材料上的盐易于去除, 这对低成本、大规模、可清洗的海水淡化光热材料的开发有重要启发。

表 1 基于纤维素棉织物的太阳能蒸发器的性能

Tab. 1 Performance of a solar evaporator based on cellulose cotton fabrics

光热材料	基质材料	水蒸发速率/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	光热转换效率/%	光照强度/ ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$)	参考文献
rGO	CF	1.39	87.0	1	[26]
金属-多酚网络/rGO	CF	1.20	—	1.5	[27]
PPy	CF	1.56	90.5	1	[28]
MnO ₂ 纳米片	CF	1.40	87.5	1	[29]
再生木质纤维素	CF	1.39	84.0	1	[30]
CB	CF	1.37	91.3	1	[31]
聚苯胺	CF	1.47	97.0	1	[32]
CNT	CF	1.59	—	1	[33]
漆酚-铁螯合聚合物球体	CF	1.49	91.7	1	[34]

2.5 纤维素泡沫

纤维素泡沫的微孔结构使其具有质量轻、输水快、导热系数低等特性, 在太阳能海水淡化领域的应用值得探索。Zhang 等^[35]沿着细菌纤维素纳米纤维原位合成硫化铜(CuS), 将获得的 CuS/BC 光化学复合材料作为顶部光热层, 再生的 BC 生物泡沫作为输水和保温层, 致密的网状结构对盐传导有很强的阻碍作用, 此蒸发器的蒸发速率高达 $1.44 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 蒸发效率达到 83.5%, 高于大多数已报道的 BC 基太阳能蒸发器的性能。Sui 等^[36]首先通过静电纺丝和原位逐层自组装技术制备了 CNF/GO 杂化膜, 将该膜在 NaBH₄ 水溶液中进行发泡处理, 将二维膜转化为三维泡沫, 该三维泡沫具有 94.2% 的太阳能蒸汽转换效率和 $1.83 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的蒸发速率。这些研究不仅展示了纤维素泡沫在未来海水淡化中的应用潜力, 还为未来的研究和开发提供了重要的启示和方向。

3 总结与展望

纤维素基材料作为一种环境友好的基质材料, 不仅在界面水蒸发中展现了巨大的应用潜力, 还在光热转换和蒸发过程中发挥了多重作用。通过其独特的多孔结构、高表面积和优良的吸水性能, 纤维素基材料显著提升了光热材料的整体性能和蒸发效率, 未来在光热蒸发器和水处理领域具有广阔的应用前景。然而, 目前纤维素基质材料在海水淡化中还存在一些挑战, 如机械强度、耐盐性和制备成本等方面的限制。未来的研究方向包括进一步优化纤维素基质材料的结构和性能, 提高其机械强度和抗盐性, 降低制备成本, 以实现大规模应用的可行性。同时, 还需要探索纤维素基质材料与其他材料的复合应用, 进一步提高太阳能蒸发器的效率和稳定性, 推动海水淡化技术的发展。

参考文献:

- [1] SALEEM H, ZAIDI S J. Nanoparticles in reverse osmosis membranes for desalination; a state of the art review[J]. Desalination, 2020, 475: 114171.
- [2] MAFTOUH A, FATNI O E, BOUZEKRI S, et al. Economic feasibility of solar-powered reverse osmosis water desalination; a comparative systemic review[J]. Environmental science and pollution research, 2023, 30(2): 2341-2354.
- [3] ELLERSDORFER P, OMAR A, TAYLOR R A, et al.

- Multi-effect distillation: a sustainable option to large-scale green hydrogen production using solar energy[J]. *International journal of hydrogen energy*, 2023, 48(81): 31491–31505.
- [4] THABIT Q, NASSOUR A, NELLES M. Water desalination using the once-through multi-stage flash concept: design and modeling[J]. *Materials*, 2022, 15(17): 6131.
- [5] CHEN C J, KUANG Y D, HU L B. Challenges and opportunities for solar evaporation[J]. *Joule*, 2019, 3(3): 683–718.
- [6] 徐赫, 韩鹏博, 秦安军, 等. 光热材料的发展现状及应用前景[J]. *化学学报*, 2023, 81(10): 1420–1437.
- [7] BRONGERSMA M L, HALAS N J, NORDLANDER P. Plasmon-induced hot carrier science and technology[J]. *Nature nanotechnology*, 2015, 10(1): 25–34.
- [8] ALMOND D P, PATEL P M. Photothermal science and techniques [M]. Dordrecht: Springer, 1996.
- [9] XI S B, WANG L L, SHAO F L, et al. Ecofriendly chitosan-derived carbon aerogels based eutectic hydrated salts for good solar thermal energy storage and corrosion mitigation effect[J]. *Energy and buildings*, 2022, 271: 112336.
- [10] LIU H J, ALAM M K, HE M T, et al. Sustainable cellulose aerogel from waste cotton fabric for high-performance solar steam generation[J]. *ACS Applied materials & interfaces*, 2021, 13(42): 49860–49867.
- [11] CAO S S, RATHI P, WU X H, et al. Cellulose nanomaterials in interfacial evaporators for desalination: a “natural” choice[J]. *Advanced materials*, 2021, 33(28): 2000922.
- [12] YUAN Q, HUANG L Z, WANG P L, et al. Cellulose nanofiber/molybdenum disulfide aerogels for ultrahigh photothermal effect[J]. *Journal of colloid and interface science*, 2022, 624: 70–78.
- [13] HAN X H, DING S Q, FAN L W, et al. Janus biocomposite aerogels constituted of cellulose nanofibrils and MXenes for application as single-module solar-driven interfacial evaporators[J]. *Journal of materials chemistry A*, 2021, 9(34): 18614–18622.
- [14] CAO X L, DONG W X, YAN J Y, et al. BC/GO-Ag composite aerogel with synergistic enhanced photothermal performance for efficient solar water evaporation[J]. *Solar energy*, 2023, 255: 26–35.
- [15] ZHANG D, LIANG Q Q, ZHOU Z, et al. Multifunctional bacterial cellulose photothermal aerogels with multi-bonded network assisted by carbon nanotube[J]. *Chemical engineering journal*, 2023, 470: 144436.
- [16] WANG F Y, ZHAO S J, JIANG Y, et al. Bacterial cellulose-based porous Janus aerogels for efficient interfacial solar steam generation[J]. *Desalination*, 2024, 579: 117506.
- [17] VAN GOETHEM C, VERBEKE R, PFANMÖLLER M, et al. The role of MOFs in thin-film nanocomposite (TFN) membranes[J]. *Journal of membrane science*, 2018, 563: 938–948.
- [18] MAVUKKANDY M O, MCBRIDE S A, WARSINGER D M, et al. Thin film deposition techniques for polymeric membranes: a review[J]. *Journal of membrane science*, 2020, 610: 118258.
- [19] SU J B, XIE Y N, ZHANG P K, et al. Janus MXene-based photothermal membrane for efficient and durable water evaporation[J]. *Desalination*, 2023, 566: 116905.
- [20] GAN W T, WANG Y X, XIAO S L, et al. Magnetically driven 3D cellulose film for improved energy efficiency in solar evaporation[J]. *ACS Applied materials & interfaces*, 2021, 13(6): 7756–7765.
- [21] QIN Y, LI Y Z, WU R J, et al. Bilayer designed paper-based solar evaporator for efficient seawater desalination[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(19): 3487.
- [22] DONG C L, YUAN Y, SONG G F, et al. Flexible plasmonic cellulose papers for broadband absorption and efficient solar steam generation[J]. *Science China materials*, 2023, 66(3): 1097–1105.
- [23] LIU X J, TIAN Y P, CHEN F Q, et al. A waterbomb origami tower for convertible photothermal evaporation[J]. *Journal of materials chemistry A*, 2022, 10(36): 18657–18670.
- [24] MAITY S, YADAV M, PATRA A K. Polypyrrole coated textiles as photothermal material for interfacial solar evaporation[J]. *Fibers and polymers*, 2023, 24(10): 3591–3600.
- [25] HAN L, ZHOU H F, FU M T, et al. Manufacturing robust MXene-based hydrogel-coated cotton fabric via electron-beam irradiation for efficient interfacial solar evaporation[J]. *Chemical engineering journal*, 2023, 473: 145337.
- [26] SALEQUE A M, THAKUR A K, SAIDUR R, et al. rGO coated cotton fabric and thermoelectric module arrays for efficient solar desalination and electricity generation[J]. *Journal of materials chemistry A*, 2024, 12(1): 405–418.

(下转第37页)

- 2020, 47(6): 337–345.
- [16] 舒骅, 薛毓才, 黄旭雄. 不同温度盐度下饵料对卤虫生长及体内类胡萝卜素积累的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2024, 33(1): 86–98.
- [17] MAKRIDIS P and VADSTEIN O. Food size selectivity of *Artemia franciscana* at three developmental stages[J]. Journal of plankton research, 1999, 21(11): 2191–2201.
- [18] SHI T, YU A, LI M, et al. Identification of a novel C22- Δ 4-producing docosahexaenoic acid (DHA) specific polyunsaturated fatty acid desaturase gene from *Isochrysis galbana* and its expression in *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Biotechnology letters, 2012, 34(12): 2265–2274.
- [19] GLADYSHEV M I, KHARITONOV A Y, POPOVA O N, et al. Quantitative estimation of dragonfly role in transfer of essential polyunsaturated fatty acids from aquatic to terrestrial ecosystems[J]. Doklady biochemistry and biophysics, 2011, 438(1): 141–143.
- [20] 何健泽, 陈俊辉, 姜雪亚, 等. 佐夫色绿藻高产虾青素的诱导条件及发酵工艺优化[J]. 现代食品科技, 2021, 37(5): 52–62.
- [21] CHEN Z Q, XIAO J, LIU H, et al. Astaxanthin attenuates oxidative stress and immune impairment in *D*-galactose-induced aging rats by activating Nrf2/Keap1 pathway and suppressing NF- κ B pathway[J]. Food and function, 2020, 11(9): 8099–8111.
- [22] DAI M Q, LI C J, YANG Z, et al. The astaxanthin aggregation pattern greatly influences its antioxidant activity: a comparative study in Caco-2 Cells[J]. Antioxidants, 2020, 9(2): 1–13.
- [23] CHENG T C. Specificity and the role of lysosomal hydrolases in molluscan inflammation[J]. International journal of tissue reactions, 1986, 8(6): 439–445.
- [24] 邹广众, 陈军, 张传永, 等. 卤虫发育过程中几种免疫相关水解酶的测定[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(4): 1888–1889.

责任编辑: 郎婧

(上接第 6 页)

- [27] DING Y, YUAN Q, MA M G, et al. Engineering metal-phenolic networks anchored cotton fabrics with boosted photothermal properties for sustainable solar desalination[J]. Cellulose, 2024, 31(6): 3893–3906.
- [28] ZHONG X, WU Y M, ZHANG P, et al. Turnover polypyrrole decorated cotton fabric based solar evaporator for cost-effective and steady desalination[J]. Journal of cleaner production, 2023, 417: 138088.
- [29] XIONG J, ZHANG Z N, YI J, et al. Hierarchical MnO₂ nanosheets grown on cotton fabric as a flexible and washable solar evaporator for seawater desalination[J]. ACS Applied nano materials, 2021, 4(12): 13724–13733.
- [30] LI J Y, GAO J K, FANG J Y, et al. Environmental-friendly regenerated lignocellulose functionalized cotton fabric to prepare multi-functional degradable membrane for efficient oil-water separation and solar seawater desalination[J]. Scientific reports, 2023, 13(1): 5251.
- [31] TIAN Y K, LI Y J, ZHANG X Y, et al. Breath-figure self-assembled low-cost janus fabrics for highly efficient and stable solar desalination[J]. Advanced functional materials, 2022, 32(33): 2113258.
- [32] DING R H, MENG Y S, QIAO Y Q, et al. Functionalizing cotton fabric via covalently grafting polyaniline for solar-driven interfacial evaporation of brine[J]. Applied surface science, 2022, 598: 153665.
- [33] KOU H, LIU Z X, ZHU B, et al. Recyclable CNT-coupled cotton fabrics for low-cost and efficient desalination of seawater under sunlight[J]. Desalination, 2019, 462: 29–38.
- [34] BAI W B, LIN H M, ZHENG S J, et al. Highly efficient water steam generation via natural black urushiol-Fe polymeric microspheres coated-cotton fabric[J]. Desalination, 2022, 538: 115906.
- [35] ZHANG D, ZHANG M H, CHEN S Y, et al. Scalable, self-cleaning and self-floating bi-layered bacterial cellulose biofoam for efficient solar evaporator with photocatalytic purification[J]. Desalination, 2021, 500: 114899.
- [36] SUI Z Y, XUE X L, WANG Q H, et al. Facile fabrication of 3D Janus foams of electrospun cellulose nanofibers/rGO for high efficiency solar interface evaporation[J]. Carbohydrate polymers, 2024, 331: 121859.

责任编辑: 周建军